应用苔藓植物监测水体污染——研究、应用与展望

李丹丹，杨军，宋玉玲，朱桦，于晶，郭水良*

（上海师范大学 生命科学学院，上海 200234）

摘　要：苔藓植物是环境污染的重要指示生物，但是国内主要开展了应用苔藓植物进行大气污染的监测。国外已有较多应用苔藓植物进行水体质量监测的工作。本文首先统计分析了国际上应用苔藓植物进行水环境质量监测研究文献，然后从苔藓植物监测的水体污染物类型、监测用苔藓植物种类、苔藓植物材料存活状态对监测效果的影响、影响苔藓植物富集水体重金属元素的环境因素、应用苔藓植物进行水体污染监测的主动与被动方法、样品预处理方法和水体质量监测的应用案例等方面，系统介绍了国际上应用苔藓植物进行水体污染监测的研究和应用概况，提出了今后应用苔藓植物监测水体污染研究值得关注的领域。

关键词：苔藓植物，苔藓生物指示，水体污染，综述

中图分类号：Q948；S718. 51　　　　**文献标识码：**A

Bryomonitoring to water pollution——Researches, application and prospect

LI Dandan, YANG Jun, SONG Yuling, ZHU Hua, Yu Jing, GUO Shuiliang*

(*College of Life Sciences, Shanghai Normal University*, Shanghai 200234, China)

Abstract: Bryophytes are important indicators of environmental pollution. However, bryophytes are mainly used to monitor atmospheric pollution in China. In fact, bryophytes have been widely applied to monitor water quality abroad. In the present paper, we firstly analyzed the literature of applying bryophytes to monitor water environmental quality abroad, then summarized relevant content of bryomonitoring, which included the types of water pollutants monitored by bryophytes, the species of bryophytes used for bryomonitoring, the influences of the survival status of bryophytes on monitoring effect, the environmental factors affecting the enrichment of heavy metal elements in water by bryophytes, the active and passive methods of applying bryophytes to monitor water pollutions, and the sample preparation, as well as some European cases of bryomonitoring for water environmental quality. Finally we also proposed some suggestions about bryomonitoring researches and application in the future.

Key words: Bryophyte, bryomonitoring, water pollution, review

苔藓植物（Bryophytes）是特殊的高等植物类群，种数仅次于被子植物。根据最新的分类系统，苔藓植物包括 3 个门：苔类植物门（Marchentiophyta, liverworts）（3 纲，83 科，391 属，5 000 种左右）；角苔植物门（Anthocerophyta, hornworts）（2 纲，5 科，14 属，300 多种）；藓类植物门（Bryophyta, moss）（8 纲，11 科，854 属，大约 12 800 种）（Goffinet & Shaw, 2009; Vanderpoorten & Goffinet, 2009）。中国境内的苔藓植物有 150 科 591 属 3021 种（贾渝和何思, 2013）。

基金项目：上海植物种质资源工程技术研究中心项目(S17DZ2252700)；上海市科委重点项目(12490502700) [Supported by Shanghai Engineering Research Centre of Plant Germplasm Resources(S17DZ2252700); the Key Program of Shanghai Committee of Science and Technology(12490502700)]。

作者简介：李丹丹（1989-），博士，讲师，主要从事苔藓植物系统分类、生态与功能基因组学研究，（E-mail）lidan824@shnu.edu.cn。

***通信作者：**郭水良，教授，博士研究生导师，主要从事植物系统分类与生态学、生物安全研究，（E-mail）guoshuiliang@163.com。

苔藓植物配子体占优势，叶片一般由单层或少数几层细胞构成，体表无蜡质的角质层覆盖，没有由维管组织构成的输导系统，当其暴露于污染环境中时，重金属等污染物质可从背腹两面侵入叶细胞之中。由于表面积与体积比高，因而有很强的吸附环境污染物的能力。营养主要来自茎叶体表面吸收，对环境变化特别敏感（郭水良和曹同, 2001）。苔藓植物独特的生物学特性使之适合应用于环境污染的监测。苔藓植物对重金属等污染的敏感性远高于种子植物（Manning & Feder, 1980）。由于苔藓植物取材容易，分布广泛，因此被广泛应用于环境质量的生物指示和监测。在水体环境中，由于污染物浓度太低而处于仪器检测的范围外，但是水体中的苔藓植物对重金属元素或其他污染物有生物富集作用，从而使苔藓植物能够用于对水体污染的监测。

国内有关苔藓植物进行环境质量监测和评估的工作主要集中在大气与土壤环境，这方面的综述也较多（方炎明等, 2000; 孙守琴和王定勇, 2004; 魏海英和方炎明, 2004; 黄建斌和肖化云, 2008; 许春晖和卢龙, 2010; 王爱霞和方炎明, 2011; 姜苹红等, 2015）。由于应用苔藓植物进行水体质量监测的工作，在国内还几乎是空白状态，但是欧洲这方面研究和应用的历史较长，本文主要介绍有关应用苔藓植物进行水体环境监测与评估研究在国外的情况，旨在为国内开展苔藓植物水环境质量监测研究和实践提供借鉴。

1 应用苔藓监测水体污染研究的基本概况

在“中国知网”数据库中检索“苔藓植物”、“藓类植物”、“重金属”、“污染”、 “大气”、“指示”、 “监测”、“藓”、“种群”、“水体”、“溪流”、“河道”等词在标题中出现情况，在 114 个中文刊物上共有关于苔藓植物环境质量监测（bryophyte monitoring to environmental quality, BMEQ）方面的论文 198 篇，另外还有硕士学位论文 38 篇。这些论著主要关于大气与土壤污染，部分涉及到氮沉降、酸雨，以及苔藓植物对污染物的生理响应等，少量涉及到多环芳烃有机污染。尽管有众多有关 BMEQ 的论文，但是关于苔藓植物对水环境质量监测（bryophyte monitoring to water quality, BMWQ）方面的学术论文极少，有关这方面的报道仅见于上海师范大学郑园园（2010）有关陆生苔藓植物对水体环境适应的光合生理基础及其在水环境监测中的应用潜力，胡鸿兴等（2009）、张永锋等（2018）有关湿地沼泽苔藓植物重金属含量及泥炭藓湿地对重金属元素的净化功能，以及 Xu et al.（2012）实验条件下分析了两种陆生藓类植物（弯叶灰藓 *Hypnum hamulosum* 和勃氏青藓 *Brachythecium brotheri*）对 Cr 和 Cd 的监测潜力。

在 Web of Science 标题中检索 bryophyte, moss, liverwort, metal, trace element, pollution, contamination, contaminated, polluted, air, atmosphere, soil, Pb, Cr, Cu, Cd, SO_2, nitrogen, deposition, air, atmosphere, soil, aquatic, lake, river, stream, water, indication, biomonitoring, indicator, monitor 这些内容，共得到 534 篇自 1973 年以来的 BMEQ 方面的论文，主要的研究领域是大气重金属污染的监测与生物指示、有机污染物、氮沉降的生物指示以及对苔藓植物的生物学效应等。相比于国内的情况，国外学者很早就关注 BMWQ 方面的工作，这方面先后也有 49 篇论文（仅标题检索），这方面工作的主要学者有意大利 Trieste 大学的 Cesa、西班牙 Santiago De Compostela 大学的 Debén 等。

在标题检索的 49 篇 BMWQ 的论文中，有少数是有关溪流等天然水体中苔藓植物分布、重金属含量及其与环境因素间关系研究（Kapfer et al., 2012; Puczko et al., 2018; Vázquez et al., 2019），其余大部分是有关应用苔藓植物进行水体质量监测的技术方法与方案（de Traubenberg & Ah-Peng, 2004; Figueira & Ribeiro, 2005；Merdanic et al., 2007；Cesa et al., 2010，2015；Kari-Matti & Heta, 2010；Debén et al., 2019a, b）、监测案例（Mersch & Johansson, 1993; Mersch et al., 1993; Hongve, 2002; Simona, 2012）和研究综述（Augusto et al., 2013; Gecheva & Yurukova, 2014; Debén et al., 2015, 2017）。

Debén et al.（2015）用 the SciVerse SCOPUS 在线工具，检索了 2015 年前有关利用原位生长的水生苔藓植物进行内陆水环境质量监测的文献，发现 1979 至 2013 年期间共有 73 篇这方面的论文，其中 80%是基于欧洲开展的工作，97%是涉及到无机元素的生物监测，极少数涉及有机污染物的监测，有 15%的文献侧重于方法探索，81%的作者仅发表一篇这方面主题的论文，监测技术方法并不标准规范。

苔藓植物主要被用于水体中重金属污染的检测（Gecheva & Yurukova, 2014），但是这类方法也可以用于水体有机污染物的监测，报道的有机污染物包括恶喹酸（oxolinic acid）、氟甲喹（flumequine）、土霉素（oxytetracycline）、杀菌剂（antibacterial agents）（Delépée et al., 2004）、多氯化联二苯（polychlorinated biphenyl）

和六氯环己烷（hexachlorocyclohexanes）（Mouvet et al., 1985）、多环芳烃（polycyclic aromatic hydrocarbons）（Roy et al., 1996）等。Mouvet et al.（1985）将采自清洁水体中的复边藓（*Cinclidotus danubicus*）制成藓袋固定在 Durance 河流中，以监测河流中多氯联苯 PCBs、六氯环己烷 HCH 的污染程度。Sashwati et al.（1996）和 Viskari et al.（1997）用藓袋法监测了高速公路和河流的多环芳烃 PAHs 污染。另外，基于水藓在氟污染胁迫的生理应急反应，Vázquez et al.（2012）开展了城市氟污染的生物监测。

苔藓植物在监测水体放射性物质上也有应用潜力（Hongve et al., 2002）。早在 1973 年，就有运用复边藓（*Cinclidotus danubicus*）监测法国境内水体放射性物质的报道（Kirchmann & Lambinon, 1973）；水藓也曾被用于监测水体中的放射性物质 Cs^{137}, Cs^{124}, U^{235}, Ra^{236}, Th^{232} 和 K^{40}（Mishev et al., 1996）。

苔藓植物也被用于水体富营养化程度的评估（Hime et al., 2009）。在基于大型水生植物水体富营养化程度的欧盟评估系统中也包括了苔藓植物，例如法国的“Indice Biologique Macrophytique en Riviere, IBMR”、德国“German Reference Index”、英国的“Mean Trophic Rank, MTR”和荷兰的“Macrophyte Score”（Birk et al., 2006）。植物群落中苔藓植物的组成情况也能指示水体的健康或类型。人们发现在生境稳定的溪流中，苔藓植物群落的主要种类是水藓（*Fontinalis antipyretica*）和水生长喙藓（*Rhynchostegimum riparioides*）（Lang & Murphy, 2012），波瓣合叶苔（*Scapania undulata*）和褐黄水灰藓（*Hygrophypnum ochraceum*）是溪流上游段贫营养化地段的指示苔藓植物，水灰藓（*Hygrohypnum luridum*）和裂萼苔（*Chiloscyphus polyanthus*）是富含钙质和矿物质的溪流的指示苔藓植物。

2 用于水环境质量监测的苔藓植物种类

苔藓植物体表面积体积比、表面结构特征、茎与枝上有无附属物等，随着种类而不同，从而造成捕获污染物能力有差异。由于苔藓分布上的差异，不同地区藓袋法所用的苔藓植物种类也有差异。理论上，尽量选择表面体积比大、叶片表面有疣而粗糙不平、茎枝上有毛状附属、植物体型大、分布广、生物量大、富集能力强的种类。人们用 BCF（Bioconcentration factor, 样品中污染物浓度/环境背景中的污染物浓度）反映生物指示能力。水藓（*Fontinalis antipyretica*）的 BCF 值极高，对铅的 BCF 值为 3 200，而对 Zn 的高达 9 400（Dietz, 1972）。在水藓、溪边青藓（*Brachythecium rivulare*）、水生长喙藓和波瓣合叶苔中，López & Carballeira（1993）发现波瓣合叶苔和水生长喙藓的 BCF 值最高。

目前，已有不少苔藓植物用于水环境质量的监测。水藓属植物（*Fontinalis* sp.）是水体质量监测中应用得最广泛的类群，它们对 Cu 敏感，但是对 Cd 不敏感（Gecheva & Yurukova, 2014）。水藓和美喙藓（*Eurhynchium riparioides*）分布于温带水体环境中，在监测水体重金属污染程度方面具有很大的应用潜力（Say et al., 1981; Gecheva & Yurukova, 2014），在欧洲的比利时、保加利亚、匈牙利、英国、德国、法国和波兰等均有应用的报道（Gecheva & Yurukova, 2014）。青藓科美喙藓属的种类 *Eurhynchium riparioides*（异名：圆叶平灰藓 *Platyhypnidium riparioides*）、*Eurhynchium rusciforme*、水生长喙藓等由于地理和生态分布上广，也广泛应用于水质监测（Wehr & Whitton, 1983a）。Cesa et al.（2006, 2008, 2009a, b, 2010）应用基于水生长喙藓的藓袋法，比较深入地研究了意大利一些水体的环境质量，展示了生物富集现象的空间格局，以及 Pb、Cu 的长期污染和 Cr、Zn、Ni 断断续续的污染现象。总体上讲，水藓和水生长喙藓在水体污染监测上应用的最为广泛（Gecheva & Yurukova, 2014）。

Suzuki et al.（2016）研究了铜矿尾矿附近水域中生长的苔藓植物对铜和砷的富集情况，发现在汞的背景值仅为 0.005 $mg \cdot L^{-1}$ 的水体中，剑叶藓（*Scopelophila cataractae*）能够富集 1 300 $mg \cdot kg^{-1}$（干重质量）的砷，并发现羽枝青藓（*Brachythecium plumosum*）和水生长喙藓可能对铜和砷也有很强的富集能力。

泥炭藓体表层拥有大量的离子交换官能团，对存在于空气中或水体中的金属物质有较高吸附和累积能力，因此，泥炭藓是藓袋法最常用的藓类材料（Hynninen, 1986; Aničić et al., 2009），常用到耳叶泥炭藓（*Sphagnum auriculatum*）、尖叶泥炭藓（*S. capillifolium*）、暖地泥炭藓（*S. junghuhnianum*）、白齿泥炭藓（*S. girgensohnii*）等。

3 影响苔藓植物对水体重金属元素监测的因素

要应用苔藓植物监测水环境中的重金属污染情况，需要了解水环境理化性质对苔藓植株内重金属元素

含量的影响。Empain（1988）发现藓类植物体内铜含量与水体背景中的含量呈正相关关系。水体中的 pH 对苔藓植物的重金属元素富集有重要影响。藓类植物对水体 中 Pb 和 Al 的富集强烈受到水体 pH 的影响（Mersch & Pihan, 1993）。可溶性有机物、雨水等增加水体中氢离子浓度降低了波瓣合叶苔中 Al、Mn 和 Zn 的生物富集能力，而且在酸性环境中（pH < 5.5）富集在苔藓植株内的 Mn 和 Al 又会被重新释放到环境中去（Caines et al., 1985；Gecheva & Yurukova, 2014）。Vázquez et al.（2000）发现酸性环境中的水藓对水体金属元素的吸收量要弱于近中性的水体环境，并推测可能是由于质子竞争性地置换了细胞外结合位点和膜转运蛋白中的金属离子；酸性环境中吸收量的降低主要是发生在胞外积累的量减少。

Cesa et al.（2011）以水藓为材料，设置要测定的元素的浓度梯度，在实验控制条件下比较了烘干失活材料和活材料对 11 种微量元素和 Ca、Mg、Na 和 K 这四种大量元素吸收的情况，发现活材料和死材料的吸收呈现相似的变化式样，对 Cd 和 Ni 的吸收量均显示出随着水体中浓度增加而线性增加，而 As、Cu、Hg 和 Pb 的吸收呈现饱和曲线式样，而 Al 和 Mn 的吸收与背景浓度没有什么关系，发现失活的水藓材料甚至比活材料能够维持部分微量元素高的吸收能力，认为失活的水藓材料在水环境质量监测上具有潜在的应用前景。

Debén et al.（2016）用 100 ℃烘箱干燥、50 ℃烘箱干燥和开水煮的三种方法处理水藓样品，用失去活力的样品进行水体重金属元素浓度的主动监测法，了解不同处理方法对监测过程中样品丧失和元素富集能力的影响，同时也用了探讨了失去活力的（陆生的）细齿泥炭藓（*Sphagnum denticulatum*）用于水体污染监测的可行性。研究发现水煮法样品在监测过程中丧失的质量极显著地多于烘干法处理样品；烘干法样品的监测结果重复性好，推荐使用烘干法处理后失活的水藓样品进行藓袋法水质监测。

不同的样品预处理方法也会影响到污染物测定的结果，这方面涉及到手工清洗、机器清洗、清洗液类型（自来水、蒸馏水、重蒸水、超净水、去离子水、0.2 M 或 1 N 的盐酸）、清洗时间、清洗次数、摇动强度等，但是先前的文献没有统一的标准，这影响了实验结果的可比性。Debén et al.（2015）推荐野外采集的样品要当场清洗，再到实验室用蒸馏水在尽可能短的时间内进行手工清洗。大部分先前的文献没有提及待检测的藓类植物茎尖长度对元素监测的影响情况，个别提到用茎长度 2~3 cm 或 1~2 cm 的材料进行含量测定，藓类样品的长度对有些元素含量测定结果有影响（Carballeir et al., 2008）；由于藓类不同部位生长状况的差异，建议不要用整个植株来测定元素含量。推荐根据样品情况选择棕绿色的组织进行测定（Debén et al., 2015）。样品测定前的干燥处理温度和时间在不同文献中也有较大差异，Debén et al.（2015）建议用 40 ℃干燥，以避免某些元素的丧失，另外再加上在 100 ℃下干燥一小份样品（至恒重），以确定校正系数用于计算样品元素的含量。另外样品的研磨过程要避免污染样品，以及研磨过程中温度过高。

Adamo et al.（2007）用水洗、烘箱干燥法、草酸铵萃取这 3 种方法对灰藓（*Hypnum cupressiforme*）进行预处理，不同条件预处理后的样品，重金属元素吸附效率无显著差异。因此可以用尽可能简便的方法处理样品。将苔藓样品保存在塑料袋中，去除杂质、枯死以及枯黄部分，去除孢子囊，每 100 g 干重的样品用 10 L 去离子水清洗 4 次，晾干，混合均匀备用（Tretiach et al., 2007）。

4 适用于水体污染监测的藓袋法探索

苔藓植物作为环境污染监测器可分为主动和被动两种方式：被动监测是指利用就地生长的苔藓进行监测（Steinnes et al., 1992）。主动监测是指一定时间内，将在某一标准环境下生长的苔藓植物整体或部分移植暴露于污染环境中进行监测（Wegener et al., 1992）。两者相比，被动监测多用于大范围、长时间的监测；主动监测因其不易受到植物生长的自然环境的影响，适用于特定区域，例如城市或环境污染严重区域的环境质量监测。藓袋法（moss-bag method）是将从清洁区采集的苔藓植物制成藓袋（moss bag），暴露于污染环境中一定时间进行监测，属于主动监测的一种技术。自从 Goodman et al.（1971）首次采集灰藓（*Hypnum cupressiforme*）制成藓袋，测定了威尔士西南某工业区重金属含量以来，藓袋法逐步显现出在监测环境污染的特色和优点，技术也日趋成熟，在世界范围内得到广泛应用。

藓袋法也同样被用于监测水环境质量的方法探索和实际应用（Kovács, 1992; Mersch & Pihan, 1993; Claveri et al., 1995; Roy et al., 1996; Bruns et al., 1997; Mersch & Reichard, 1998; Rasmussen & Andersen, 1999;

Cenci, 2000; Vázquez et al., 2000; Lee et al., 2002; Yurukova & Gecheva, 2003, 2004; Samecka-Cymerman et al., 2005; Cesa et al., 2006, 2010；Diviš et al., 2012; Augusto et al., 2013）。Kelly et al.（1987）认为藓袋法是监测水环境重金属污染程度有效而便利的方法。藓袋法对于监测河流中重金属元素导致的慢性污染非常有效（Mersch & Reichard, 1998; Cenci, 2000; Figueira & Ribeiro, 2005）。

用藓袋法进行水环境质量监测时，需要考虑单位面积中藓袋的数目、藓袋中藓类植物的选择、配子体材料的数量、藓类的大小、固着还是悬浮于水体中、在水体中浸没的时间、元素测定时藓类植物材料的预处理方案等（Gecheva & Yurukova, 2013）。Kelly et al.（1987）以水生长喙藓和水藓为材料，应用藓袋法开展了英国北部先前铅矿区的河道水体中重金属元素的监测，用尼龙网制作藓袋，用网孔为 0.9 cm^{-1}、0.7 cm^{-1} 两种规格的尼龙网制作成 20 cm×20 cm 大小的藓袋，每个藓袋有 15~20 g 质量、新鲜健康、2 cm 长的配子体枝的茎尖的材料，实验用的藓类植物采集自低重金属污染的区域。装有藓类材料的藓袋固着沉没于（周围高重金属污染）的流水中。监测随着浸没时间（2, 4, 6, 8, …100 h）后重金属含量的富集情况。研究发现，随着浸没时间的延长，藓袋法得到的重金属富集量增加。

为了提出一个有效的用水生苔藓植物监测水环境重金属元素浓度的标准方案，Cesa et al.（2015）研究了藓袋法中不同藓类植物，以及配子体不同的组成在吸收水体中 As、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb 和 Zn 上的差异，他们的研究工作涉及到复边藓属种类（*Cinclidotus aquaticus*）、水藓、美喙藓属种类（*Eurhynchium riparioides*, 原文中用了 *Platyhypnidium riparioides* 这个异名），发现不同的藓类种类，不同的材料来源（整株或仅叶尖）组成的藓袋，对金属元素的吸收存在明显差异，三种藓类植物对 Cu、Ni、Mn、Pb 和 Zn 的富集系数均大于 2 ，以 *Eurhynchium riparioides* 的吸收能力最强，且以配子体叶尖为藓袋材料的结果重复性最好，因此 Cesa et al.（2015）推荐以 *Eurhynchium riparioides* 的叶尖材料制作的藓袋进行水环境监测。除上述藓类植物，主动法监测水体环境重金属污染程度时，人们也采用过 *Scapania undulata*（McLean & Jones, 1975）。

藓袋法开展水体质量测量时，藓袋大小、藓袋中的藓类材料数量、固着或悬浮状态对监测结果有很大影响（Gecheva & Yurukova, 2013）。每个藓袋中藓类植物材料的数量差异很大，用水藓材料的试验中有 5 g（Samecka-Cymeman et al., 2005)、10~12 g （Mersch & Pihan, 1993; Bruns et al., 1997；Cenci, 2000; Vázquez et al., 2000）、20 g（Roy et al., 1996; Diviš et al., 2012）、100 g（Augusto et al., 2013）、500 g（Kovács, 1992; Lee et al., 2002）等。藓袋沉没在水体中的时间至少 24 h（Kelly et al., 1987），也有建议至少不短于 5 d （López et al., 1994），但是在污染严重的水体中最好不要超过 1 个月（Gecheva & Yurukova, 2014）。水藓是最常用的水环境污染监测用藓类植物（Bruns et al., 1997），但是不同的季节、水体中的固着方式会影响到藓袋法对水体重金属元素的监测效果。Bruns et al.（1997）发现用悬浮于水中的方法，在秋季和冬季用水藓来监测水环境污染效果最好。

5 被动监测法评估水体污染状况

被动监测法是指利用就地生长的苔藓植物进行环境污染程度监测的方法。被动监测法也被应用于水体重金属污染的监测（Say & Whitton, 1983; Wehr & Whitton, 1983a；Yurukova et al., 1996; Samecka-Cymerman et al., 2002; Yurukova & Gecheva, 2004; Vázquez et al., 2007; Samecka-Cymerman et al., 2011）。水环境污染被动监测法一般是应用一些分布广、对重金属元素富集能力强的一些苔藓植物，代表性的有水生长喙藓、波瓣合叶苔、水灰藓（*Hygrohypnum duriusculum*）、波叶仙鹤藓（*Atrichum undulatum*）、拟三列叶真藓（*Bryum pseuotriquetrum*）、扇叶毛灯藓（*Rhizomnium punctatum*）、柳叶藓（*Amblystegium riparium*）、三洋藓（*Sanionia uncinata*）、范氏藓（*Warnstorfia exannulata*）、羽枝青藓（*Brachythecium plumosum*）、绒叶青藓（*Brachythecium velutinum*）和水藓等（Say & Whitton, 1983; Wehr & Whitton, 1983a；Yurukova et al., 1996; Samecka-Cymerman et al., 2002; Yurukova & Gecheva, 2004; Vázquez et al., 2007; Samecka-Cymerman et al., 2011）。水藓（Dietz, 1972; Empain, 1976, 1977; Say & Whitton, 1983; Bruns et al., 1995; Yurukova et al., 1997）、水生长喙藓（Wher & Whitton, 1983a; Wher et al., 1983; Gecheva et al., 2011）、波瓣合叶苔（Wher & Whitton, 1983b;

Samecka-Cymerman, 1991; Samecka-Cymerman & Kempers, 1993）在欧洲的水体重金属污染生态监测中应用的相对比较广泛。

被动监测这种利用就地生长的苔藓植物进行水环境污染程度监测，受到取样方案的影响。水体监测时藓类植物的取样位置对监测结果有很大的影响。Vázquez et al.（2007）提出生物监测需要一个合适的、广泛的取样网络。如果要在一个 100 km^2 的流域进行监测，且只有一个取样点，该样点应该在河流的中下游段，且尽可能位于（污染物）进入流域全境的位置；如果在 300 km^2 的流域进行监测，假如仅有两个取样点，则建议分别在河流的上游和下游出口处；如果在 500 km^2 的流域进行监测，应该在干流和主要支流的河段，每个取样段应该有 100 m 长，至少取所选择苔藓植物的五块藓丛，要关注本地背景值的测定（Gecheva & Yurukova, 2013）。保加利亚（Yurukova et al., 1997）、西班牙（Carballeira & López, 1997）、意大利（Cesa et al., 2010）等欧洲一些国家河道的苔藓植物重金属元素背景值有较好的数据积累。

Vásquez et al.（2019）在厄瓜多尔南部的 Loja 市的 Zamora 河的三个区域设置 120 个样方，调查了苔藓植物有无分布数据和浸没水中苔藓植物的盖度，并以附近森林清洁区的样品作对象，发现 Loja 市 Zamora 河分布的地钱（*Marchantia polymorpha*），检测到 5 种重金属元素 Al、Cd、Cu、Fe、Zn 及 As 的含量最高，对照区与城市区域苔藓植物群落也有明显不同，研究认为苔藓植物群落，特别是地钱适用于城市河道的水质生物监测。

水体中苔藓植物某个目标种类的丰富度，或者是苔藓群落结构也能够反映水体环境质量。大部分被动监测的方法仅测定了水体中目标藓类植物和周围环境中的重金属元素的含量，有的 BCF 值超过了 1 000（Empain, 1988）。

Samecka-Cymerman et al.（2005）比较了波兰五条溪流水体、生长基质中 N、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Al、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、V 和 Zn 的含量，以及这些溪流中原位生长的水藓和移植的水藓内这些元素的含量，发现移植的水藓样品中的 Al、Cr、Cu、Pb、V 和 Zn 的含量明显高于原位样品，但是 Co 和 Mn 的含量在原位生长的水藓样品中要高于移植水藓样品。

被动监测法中，取样设计特别重要，在季节与取样频率、取样点的数量、空间上的代表性、指示种的选择等方面要有标准规范的方法（Debén et al., 2015）。Debén et al.（2015）发现大部分学者的取样时间在春季或夏季，建议每个季节至少采样一次。至于取样的时间，合适的季节取决于河道水位情况，以有利于采样为考虑依据。河流的取样点至少要二个，分别在上游和下游，每个样点上再取 5 -10 个不同位置的样品，每个点上的样品鲜重在 30~300 g FW。至于取样点的空间代表性，Debén et al.（2015）认为要考虑河床的宽度、水位、流速、河岸特点、拦坝等因素。至于水质量被动监测的苔藓种类，68%的研究使用了水藓属的种类，主要是这类植物形态大，容易鉴定，分布广泛。由于实际应用中还涉及水藓以外的种类，例如溪边青藓、美喙藓属种类（*Eurhynchium riparioides*）等，因此需要研究不同种类对水体污染元素吸收上的差异。

应用原位分布的或移植的苔藓植物进行水体生态状态评估优势明显，例如全年均能采集到合适的样品；取样成本低、速度快，适用于所有淡水栖息地类型，分析测试也方便，通过被动监测的方法掌握污染的历史，用藓袋法等主动监测的方法能够了解不同时间点的污染物沉降情况。另外，苔藓植物耐低温抗冻害，不为动物啃食，而且苔藓植物耐荫、光补偿点低，这也使它们成为水环境生态状态监测的理想材料（Gecheva & Yurukova, 2014）。

6 苔藓植物在水环境质量监测的应用情况

除了苔藓植物体表吸收、表面积与体积比大，没有角质层等有利于吸附水体中污染物等优势外，原位生长或移植的苔藓植物作为水环境质量的指示生物还具有其他的一些明显优点：能够终年获得苔藓植物材料，成本也低，取样迅速便利，能够用于不同类型的水体环境，样品预处理（消化等）简便，而且苔藓植物通过营养繁殖体或有性繁殖进行传播；另外，苔藓植物抗寒能力极强，且不容易被动物啃食，加上苔藓植物光补偿点低、耐荫能力强（Gecheva & Yurukova, 2014）。

苔藓植物在国际上一些大的水环境质量评估项目中也得到了应用。欧盟水框架指令（The Water Framework Directive 2000/60/EC（WFD）European Union 2000）要求各成员国水体达到好的生态状态，根据水质好坏将水体分成五个等级（high, good, moderate, poor and bad），反映生态质量率（ecological quality ratio,

EQR）。WFD 要求不同成员国之间的这个 EQR 有可比性。水生苔藓植物激流生态系统中的优势成分，特别是在人为干扰少的水域，它们与水环境因子间的关系研究得比较深入（Scarlett & O'Hare, 2006；Gecheva et al., 2013）。在欧盟水框架指令下，Cesa et al.（2013）开展了应用苔藓植物开展意大利东北部地区水环境质量主动连续监测网络的设计。监测点分布在流经意大利东北部，那里有合法和非法的排污，从而引起了零星、间断或长期的污染现象。在两年的监测过程中，共对 25 个样点进行了 300 次藓袋投放/回收的操作，其中 190 次数据可以用于比较。实践证明藓袋法为污染趋势监测和点污染追溯提供了灵活的方法，符合欧盟水框架指令（的标准）。

欧盟国家多数基于大型水生植物评估水体生态状态的工作主要集中在对水体富营养化程度的评估（Birk et al., 2006）。这类评估系统多数也包括了水生苔藓植物，例如法国的"Indice Biologique Macrophytique en Riviere, IBMR"、德国"German Reference Index"、英国的"Mean Trophic Rank, MTR"和荷兰的"Macrophyte Score"。其中溪边青藓、水藓包括在 MTR、IBMR 系统中（Szoszkiewicz et al., 2006）。在 MRT 系统中，水藓和水生长喙藓被列为对水体富营养化有中等耐受程度的物种，溪边青藓作为低耐受性的物种。在 IBMR 系统中，水藓和溪边青藓作为对有机污染物有耐受性的物种（Gecheva & Yurukova, 2014）。在其他的一些水体生态状态评估系统中（Macrophyte Prediction and Classification, MACPACS），MAssessment and Classification（MAC）中也包括了苔藓植物（Aguiar et al., 2011; Feio et al., 2012）。

7 展望

尽管国外在应用苔藓植物、特别是应用藓袋法监测水环境中重金属污染方面有不少的工作。但是这些工作在所用的样品材料、材料的大小和组织类型、藓袋大小与形状、暴露时间和位置、样品清洗时间、测定方法等方面，规范性还不够，影响了结果的可比性。大部分有关苔藓植物进行水污染监测的工作仅涉及到苔藓植物及周围水体中的重金属元素的情况，同时测定水体中的苔藓植物及生长的沉积物基质中的重金属元素含量的工作并不多，今后应该在这方面加强研究，也需要提出一个应用苔藓植物进行水环境质量监测的工作标准。

要应用苔藓植物开展我国境内水体环境质量的监测工作，需要开展相关的基础性研究，要掌握不同流域、不同地理区域、不同工业化地区河道湖泊水体的污染源大致的背景情况；搞清楚水质理化性质对苔藓植物污染元素含量的影响情况。由于水质的苔藓植物指示与监测工作主要在欧洲，而欧洲的气候条件与我国差异很大，水生苔藓植物种类与我国的也明显不同。我国地域辽阔，水生和湿生苔藓植物种类丰富，地区性差别明显。在应用其进行水环境污染监测时，不同地区采用的种类也会有差异。因此，需要加强我国水生、湿生苔藓植物的种类及地理与生态分布的研究，明确不同水生苔藓植物种类对重金属污染胁迫的适应能力，以及对污染元素的吸收富集能力。另外，欧洲的一些水体生态状况评估与长期监测的重要项目重视苔藓植物的生物指示价值，也建议今后国内这方面的项目包括水生苔藓植物。

苔藓植物对环境污染的生物指示已有几十年的研究历史，但是应用苔藓植物进行污染环境的修复的工作还鲜有报道。德国 Creative Water Solutions（www.cwsisthebest.net — CWS）发明了一种基于藓类材料净化游泳池水质的专利。游泳池中有机物质与含氯的消毒剂产生化学反应，形成了一种有毒的三卤甲烷和卤乙酸等，在游泳池中加入泥炭藓材料后，这类有毒物质会明显地减少。瑞典学者用浮生范氏藓（*Warnstorfia fluitans*），能够将水体中的砷浓度很快地降低到可饮用水的标准（https://futurism.com/moss-clean-arsenic-water）。Papadia et al.（2020）研究发现鳞叶藓 *Taxiphyllum barbieri* (Cardot & Copp.) Z. Iwats.能在几小时里对水体里高浓度的 Pb、Cd、Zn、Cu、As 和 Cr 有很强的富集能力，而鳞叶藓能够形成密集的藓丛，对营养需求也低，是一种有潜力的水体重金属污染修复的生物过滤器。现在这方面的研究受到了人们重视（Sunovska et al., 2016）。由于大部分水质监测用的苔藓植物对污染元素具有很高的富集能力，今后应该重视这些植物在环境修复上的应用开发。

目前有关苔藓植物在水污染监测上的应用，主要是限于温带的欧洲各国，应用的也主要是水生苔藓植物类群。水藓科、柳叶藓科等水生苔藓植物种类在我国分布范围有限，种群也小，如果局限于应用这类苔藓植物进行水环境质量监测，一定程度会限制了这类方法在我国的应用。因此，研究陆生、湿生藓类植物在水体环境下的生存情况，筛选出能够生存于沉水环境的陆生藓类植物，对于应用苔藓植物进行水体环境

监测具有重要应用价值。郑园园（2010）以弯叶灰藓（*Hypnum hamulosum*）、勃氏青藓（*Brachythecium brotheri*）为材料，测定了它们不同的沉水浸泡时间的生存情况，及实验条件下对 Cd^{2+}和 Cr^{3+}的富集能力，发现这三种藓类植物能够较长时间的生存于沉水环境中，对 Cd^{2+}和 Cr^{3+}污染的耐受性更强；两种藓类对水中 Cd^{2+}和 Cr^{3+}均有很强的吸收能力，也能够更适合于复合污染下的 Cd^{2+}和 Cr^{3+}吸收净化。考虑到勃氏青藓和弯叶灰藓两种藓分布广泛、生物量大、取样容易，利用这两种藓类植物，无论是水环境监测、Cr^{3+}和 Cd^{2+}污染水体的修复，还是作为水族缸植物，均具有潜在的应用价值。今后不仅关注水生、湿生苔藓植物，也关注陆生的苔藓植物，挖掘更多的能够在水体重金属污染监测中有应用前景的苔藓植物种类。

参考文献：

ADAMO P, CRISAFULLI P, GIORDANO S, et al., 2007. Lichen and moss bags as monitoring devices in urban areas. Part II: Trace element content in living and dead biomonitors and comparison with synthetic materials[J]. Environ Pollut, 146(2): 392-399.

AGUIAR FC, FEIO MJ, FERREIRA MT, 2011. Choosing the best method for stream bioassessment using macrophyte communities: Indices and predictive models[J]. Ecol Indic, 11(2): 379-388.

ANIČIĆ M, TASIĆ M, FRONTASYEVA MV, et al., 2009. Active moss biomonitoring of trace elements with *Sphagnum girgensohnii* moss bags in relation to atmospheric bulk deposition in Belgrade, Serbia[J]. Environ Pollut, 157(2): 673-679.

AUGUSTO S, MÁGUAS C, BRANQUINHO C, 2013. Guidelines for biomonitoring persistent organic pollutants (POPs), using lichens and aquatic mosses–a review[J]. Environ Pollut, 180: 330-338.

BIRK S, KORTE T, HERING D, 2006. Intercalibration of assessment methods for macrophytes in lowland streams: direct comparison and analysis of common metrics[J]. Hydrobiologia, 566(1): 417-430.

BRUNS I, FRIESE K, MARKERT B, KRAUSS G-J, 1997. The use of *Fontinalis antipyretica* L. ex Hedw. as a bioindicator for heavy metals. 2. Heavy metal accumulation and physiological reaction of *Fontinalis antipyretica* L. ex Hedw. in active biomonitoring in the River Elbe[J]. Sci Total Environ, 204(2): 161-176.

BRUNS I, SIEBERT A, BAUMBACH R, et al., 1995. Analysis of heavy metals and sulphur-rich compounds in the water moss *Fontinalis antipyretica* L. ex Hedw.[J]. Fresen J Anal Chem, 353(1): 101-104.

CAINES LA, WATT AW, WELLS DE, 1985. The uptake and release of some trace metals by aquatic bryophytes in acidified waters in Scotland[J]. Environ Pollut, 10(1): 1-18.

CARBALLEIRA A, LÓPEZ J, 1997. Physiological and statistical methods to identify background levels of metals in aquatic bryophytes: dependence on lithology[J]. J Environ Qual, 26(4): 980-988.

CARBALLEIRA CB, ABOAL JR, FERNÁNDEZ JA, et al., 2008. Comparison of the accumulation of elements in two terrestrial moss species[J]. Atmos Environ, 42(20): 4904-4917.

Cenci RM, 2000. The use of aquatic moss (*Fontinalis antipyretica*) as monitor of contamination in standing and running waters: limits and advantages[J]. J Limnol, 60(Suppl. 1): 53-61.

CESA M, AZZALINI G, DE TOFFOL V, et al., 2009a. Moss bags as indicators of trace metal contamination in Pre-alpine streams. Plant Biosyst, 143(1): 173-180.

CESA M, BALDISSERI A, BERTOLINI G, et al., 2013. Implementation of an active 'bryomonitoring' network for chemical status and temporal trend assessment under the Water Framework Directive in the Chiampo Valley's tannery district (NE Italy)[J]. J Environ Manag, 114: 303-315.

CESA M, BERTOSSI A, CHERUBINI G, et al., 2015. Development of a standard protocol for monitoring trace elements in continental waters with moss bags: inter- and intraspecific differences[J]. Environ Sci Pollut R, 22(7): 5030-5040.

CESA M, BIZZOTO A, FERRARO C, et al., 2006. Assessment of intermittent trace element pollution by moss bags[J]. Environ Pollut, 144(3): 886-892.

CESA M, BIZZOTTO A, CLAUDIO F, et al., 2010. Palladio, an index of trace element alteration for the river

Bacchiglione based on *Rhynchostegium riparioides* moss bags[J]. Water Air Soil Pollut, 208(1): 59-77.
CESA M, BIZZOTTO A, FERRARO C, et al., 2011. Oven-dried mosses as tools for trace element detection inpolluted waters: A preliminary study under laboratory conditions[J]. Plant Biosyst, 145(4): 832-840.
CESA M, BIZZOTTO A, FERRARO C, et al., 2009b. S.T.R.E.A.M. System for trace element assessment with mosses: An equation to estimate mercury concentration in freshwaters[J]. Chemosphere, 75(7): 858-865.
CESA M, CAMPISI B, BIZZOTTO A, et al., 2008. A factor influence study of trace element bioaccumulation in moss bags[J]. Arch Environ Con Tox, 55(3): 386-396.
CLAVERI B, GUÉROLD F, PIHAN JC, 1995. Use of transplanted mosses and autochthonous liverworts to monitor trace metals in acidic and non-acidic headwater streams (Vosges Mountains, France)[J]. Sci Total Environ, 175(3): 235-244.
DE TRAUBENBERG C, AH-PENG C, 2004. A procedure to purify and culture a clonal strain of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* for use as a bioindicator of heavy metals[J]. Arch Environ Con Tox, 46(3): 289-295.
DEBÉN S, ABOAL JR, CARBALLEIRA A, et al., 2015. Inland water quality monitoring with native bryophytes: A methodological review[J]. Ecol Indic, 53(1): 115-124.
DEBÉN S, ABOAL JR, CARBALLEIRA A, et al., 2017. Monitoring river water quality with transplanted bryophytes: A methodological review[J]. Ecol Indic, 81(1): 461-470.
DEBÉN S, FERNÁNDEZ JA, CARBALLEIRA A, et al., 2016. Using devitalized moss for active biomonitoring of water pollution[J]. Environ Pollut, 210: 315-322.
DEBÉN S, FERNÁNDEZ JA, GIRÁLDEZ P, et al., 2019b. Methodological advances to biomonitor water quality with transplanted aquatic mosses[J]. Sci Total Environ, 706: 136082.
DEBÉN S, ABOAL JR, GIRÁLDEZ P, et al., 2019a. Developing a biotechnological tool for monitoring water quality: In vitro clone culture of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica*[J]. Water, 11(1): 145.
DELÉPÉE R, POULIQUEN H, LE BRIS H, 2004. The bryophyte *Fontinalis antipyretica* Hedw. bioaccumulates oxytetracycline, flumequine and oxolinic acid in the freshwater environment[J]. Sci Total Environ, 322(1-3): 243-253.
DIETZ F, 1972. Die Anreicherung von Schwermetallen in submersen Pflanzen[J]. Geawasser/Abwasser, 113: 269-273.
DIVIŠ P, MACHÁT J, SZKANDERA R, et al., 2012. In situ measurement of bioavailable metal concentrations at the downstream on the Morava River using transplanted aquatic mosses and DGT technique[J]. Int J Environ Res, 6(1): 87-94.
EMPAIN A, 1976. Les bryophytes aquatiques utilisés comme traceurs de la contamination en métaux lourds des eaux douces[M]// Symposium Mémoires de la Société Royale de Botanique de Belgique, Bruxelles, 7: 141-156.
EMPAIN AM, 1977. Ecologie des populations bryophytes aquatiques de la Meuse de la Sambre et de la Somme[D]. Belgium: University of Liege.
EMPAIN AM, 1988. A posteriori detection of heavy metal pollution of aquatic habitats[M]//GLIME JM (ed) Methods in bryology. Proc. bryol. method. workshop, Mainz, Hattori Bot Lab, Nichinan, Japan: 213-220.
FANG YM, WEI Y, ZHANG XP, et al., 2000. Advance in bry-monotoring of atmosperic heavy metal pollution[J]. J Nanjing For Univ, 24(5): 64-68. [方炎明，魏勇，张晓平等，2000. 苔藓生物监测大气重金属污染研究进展[J]. 南京林业大学学报, 24(5): 64-68.]
FEIO MJ, AGUIAR FC, ALMEIDA SFP, et al., 2012. AQUAFLORA: A predictive model based on diatoms and macrophytes for streams water quality assessment[J]. Ecol Indic, 18(1): 586-598.
FIGUEIRA R, RIBEIRO T, 2005. Transplants of aquatic mosses as biomonitors of metals released by a mine effluent[J]. Environ Pollut, 136(2): 293-301.
GECHEVA G, YURUKOVA L, 2013. Water quality monitoring by aquatic bryophytes[M]//LICHTFOUSE E,

SCHWARZBAUER J, ROBERT D(eds), Green materials for energy, products and depollution, Springer: 415-448.

GECHEVA G, YURUKOVA L, CHESHMEDJIEV S, 2013. Patterns of aquatic macrophyte species composition and distribution in Bulgarian rivers[J]. Turk J Bot, 37(1): 99-110.

GECHEVA G, YURUKOVA L, GANEVA A, 2011. Assessment of pollution with aquatic bryophytes in Maritsa River (Bulgaria)[J]. B Environ Contam Tox, 87(4): 480-485.

GECHEVA G, YURUKOVA L, 2014. Water pollutant monitoring with aquatic bryophytes: A review[J]. Environ Chem Lett, 12(1): 49-61.

GOFFINET B, SHAW AJ, 2009. Bryophyte biology [M]. 2nd ed. London: Cambridge University Press.

GOODMAN GT, ROBERTS TM, 1971. Plants and soils as indicators of metals in the air[J]. Nature, 231(5301): 287-292.

GUO SL, CAO T, 2001. A study on niche of moss species on the floor in main ecological systems in Changbai Mountains[J]. Acta Ecol Sin, 21(2): 231-236. [郭水良，曹同，2001. 长白山主要生态系统地面藓类植物的生态位研究[J]. 生态学报, 21(2): 231-236.]

HIME S, BATEMAN IJ, POSEN P, et al., 2009. A transferable water quality ladder for conveying use and ecological informa- tion within public surveys[D]. CSERGE working paper EDM 09-01. University of East Anglia.

HONGVE D, BRITTAIN JE, BJORNSTAD HE, 2002. Aquatic mosses as a monitoring tool for 137Cs contamination in streams and rivers: A field study from central southern Norway[J]. J Environ Radioact, 60(1-2): 139-147.

HU HX, ZHANG YY, HE W, et al., 2009. On the purification effects of the sphagnum wetland on Cd(II), Cu(II), Pb(II), Zn(II) in Dajiuhu basin of Shennongjia mountain[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 18(11): 1050-1057. [胡鸿兴，张岩岩，何伟，等, 2009. 神农架大九湖泥炭藓沼泽湿地对镉(Ⅱ)、铜(Ⅱ)、铅(Ⅱ)、锌(Ⅱ)的净化模拟[J]. 长江流域资源与环境, 18(11): 1050-1057.]

HUANG JB, XIAO HY, 2008. Review on bio-monitoring of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) deposited from atmosphere by mosses[J]. Jiangxi Sci, 26(3): 501-515. [黄建斌，肖化云，2008. 苔藓生物监测大气沉降中多环芳烃（PAHs）污染研究进展[J]. 江西科学，26(3)：501-515.]

HYNNINEN V, 1986. Monitoring or airborne metal pollution with bags near an industrial source at Harjavalta, Southwest Finland[J]. Ann Bot Fenn, 23(1): 83-90.

JIA Y, HE S, 2013. Species catalogue of China, Vol. 1. Plant: Bryophytes[M]. Beijing: Science Press. [贾渝，何思，2013. 中国生物物种名录（第 1 卷）植物：苔藓植物[M]. 北京：科学出版社.]

JIANG PH, LUO YL, PENG KJ, et al., 2015. Progress on the research of bryophytes applied to monitoring of air pollution by heavy metal[J]. Environ Pollut Control, 37(7): 82-87. [姜苹红，罗远玲，彭克俭等，2015. 苔藓植物运用于大气重金属污染监测的研究进展[J]. 环境污染与防治, 37(7): 82-87.]

KAPFER J, AUDORFF V, BEIERKUHNLEIN C, et al., 2012. Do bryophytes show a stronger response than vascular plants to interannual changes in spring water quality? [J]. Freshwater Sci, 31(2): 625-635.

KARI-MATTI V, HETA H, 2010. The use of aquatic mosses in assessment of metal pollution: Appraisal of type-specific background concentrations and inter-specific differences in metal[J]. Hydrobiologia, 656(1): 99-105.

KELLY MG, GIRTON C, WHITTON BA, 1987. Use of moss-bags for monitoring heavy metals in rivers[J]. Wat Res, 21(11): 1429-1435.

KIRCHMANN R, LAMBINON J, 1973. Plants as bioindicators of the contamination of a river by the effluents of a PWR nuclear power station. Assessment of the radioactive releases of the Sena reactor through aquatic and ripicolous plants of the river Meuse[J]. Bull Soc Roy Bot Bel, 106: 187-201.

KOVÁCS M, 1992. Biological indicators of water pollution[M]//KOVÁCS M (ed) Biological indicators in environmental protection. Akadémiai Kiadó, Budapest: 120-130.

LANG P, MURPHY KJ, 2012. Environmental drivers, life strategies and bioindicator capacity of bryophyte communities in high-latitude headwater streams[J]. Hydrobiologia, 679(1): 1-17.

LEE J, JOHNSON-GREEN P, LEE EJ, 2002. Chemical analysis of transplanted aquatic mosses and aquatic environment during a fish kill on the Chungnang River, Seoul, Korea[J]. Korean J Biol Sci, 6(3): 215-219.

LÓPEZ J, CARBALLEIRA A, 1993. Interspecific differences in metal bioaccumulation and plant-water concentration ratios in five aquatic bryophytes[J]. Hydrobiologia, 263(2): 95-107.

LÓPEZ J, VAZQUEZ MD, CARBALLEIRA A, 1994. Stress responses and metal exchange kinetics following transplant of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica*[J]. Freshwater Biol, 32(1): 185-198.

MANNING WJ, FEDER WA, 1980. Biomonitoring air pollutants with plants[M]. London: Applied Science Publishers: 1-110.

MCLEAN RO, JONES K, 1975. Studies of tolerance to heavy metals in the flora of the rivers Ystwyth and Clarach, Wales[J]. Freshwater Biol, 5(5): 431-444.

MERDANIC H, SMAILHODZIC H, FERHATOVIC H, et al., 2007. Indicating water quality by moss[J]. J Environ Prot Ecol, 8(3): 520-525.

MERSCH J, REICHARD M, 1998. In situ investigation of trace metal availability in industrial effluents using transplanted aquatic mosses[J]. Arch Environ Con Tox, 34(4): 336-341.

MERSCH J, GUÉROLD F, ROUSSELLE P, et al., 1993. Transplanted aquatic mosses for monitoring trace metal mobilization in acidified streams of the Vosges Mountains, France[J]. Bull Environ Con Tox, 51(2): 255-259.

MERSCH J, JOHANSSON L, 1993. Transplanted aquatic mosses and freshwater mussels to investigate the trace metal contamination in the rivers Meurthe and Plaine, France[J]. Environ Technol, 14(11): 1027-1036.

MERSCH J, PIHAN JC, 1993. Simultaneous assessment of environmental impact on condition and trace metals availability in zebra mussels Dreissena polymorpha transplanted into the Wilz River, Luxembourg. Comparison with the aquatic moss *Fontinalis antipyretica*[J]. Arch Environ Con Tox, 25(3): 353-364.

MISHEV P, DAMYANOVA A, YURUKOVA L, 1996. Mosses as biomonitors of airborne pollution in the northern part of Rila Mountain. Part II. Radioactivity of mosses[M]//CARBONNEL JP, STAMENOV JN (eds) Observatoire de montagne de Moussala-OM2, vol 4: 137-141.

MOUVET C, GALOUX M, BERNES A, 1985. Monitoring of polychlorinated biphenyls (PCBs) and hexachlorocyclohexanes (HCH) in freshwater using the aquatic moss *Cinclidotus danubicus*[J]. Sci Total Environ, 44(3): 253-267.

PAPADIA P, BAROZZI F, DANILO M, et al., 2020. Aquatic mosses as adaptable bio-filters for heavy metal removal from contaminated water[J]. Int J Mol Sci, 21(13): 4769.

PUCZKO K, ZIELINSKI P, JUSIK S, et al., 2018. Vascular plant and bryophyte species richness in response to water quality in lowland spring niches with different anthropogenic impacts[J]. Environ Monit Assess, 190(6): 338.

RASMUSSEN G, ANDERSEN S, 1999. Episodic release of arsenic, copper and chromium from a wood preservation site monitored by transplanted aquatic moss[J]. Water Air Soil Pollut, 109(1-4): 41-52.

ROY S, SEN CK, HANNINEN O, 1996. Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons using moss bags: Bioaccumulation and responses of antioxidant enzymes in *Fontinalis antipyretica* Hedw.[J]. Chemosphere 32(12): 2305-2315.

SAMECKA-CYMERMAN A, KEMPERS AJ, 1993. *Scapania undulata* (L.) Dum. and other aquatic bryophytes as indicators of mineralization in Poland[J]. J Geochem Explor, 46(3): 325-334.

SAMECKA-CYMERMAN A, KOLON K, KEMPERS AJ, 2002. Heavy metals in aquatic bryophytes from the Ore

Mountains (Germany)[J]. Ecotox Environ Safe, 52(3): 203-210.
SAMECKA-CYMERMAN A, WOJTUŃ B, KOLON K, et al., 2011. *Sanionia uncinata* (Hedw.) loeske as bioindicator of metal pollution in polar regions[J]. Polar Biol, 34(3): 381-388.
SAMECKA-CYMERMAN A, 1991. Contents of arsenic, vanadium, germanium and other elements in aquatic liverwort *Scapania undulata* (L.) Dum. growing in the Sudety Mountains[J]. Pol Arch Hydrobiol, 38(1): 79-84.
SAMECKA-CYMERMAN, KOLON K, KEMPERS AJ, 2005. A comparison of native and transplanted *Fontinalis antipyretica* Hedw. As biomonitors of water polluted with heavy metals[J]. Sci Total Envir, 341(1-3): 97-107.
SASHWATI R, SEN CK , HÄNNINEN O, 1996. Monitoring of Polycyclic aromatic hydrocarbons using 'moss bags': Bioaccumulation and responses of antioxidant enzymes in *Fontinalis Antipyretica* Hedw.[J]. Chemosphere, 32(12): 2305- 2315.
SAY PJ, HARDING JPC, WHITTON BA, 1981. Aquatic mosses as monitors of heavy metal contamination in the river Etherow, Great Britain[J]. Environ Pollut, 2(4): 295-307.
SAY PJ, WHITTON BA, 1983. Accumulation of heavy metals by aquatic mosses. I. *Fontinalis antipyretica* Hedw.[J]. Hydrobiologia, 100(1): 245-260.
SCARLETT P, O'HARE M, 2006. Community structure of in-stream bryophytes in English and Welsh rivers[J]. Hydrobiologia, 553(1): 143-152.
SIMONA C, MICHELE A, SARA B, et al., 2012. Aquatic bryophytes as ecological indicators of the water quality status in the Tiber River basin (Italy)[J]. Ecol Indic, 4(1): 74-81.
STEINNES E, RAMBAEK JP, HANSSEN JE, 1992. Large scale multielement survey of atmospheric deposition using naturally growing moss as biomonitor[J]. Chemosphere, 25(5): 735-752.
SUN SQ, WANG DY, 2004. Advance in indication function of bryophyte to air pollution[J]. Sichuan Environ, 23(5): 31-35. [孙守琴，王定勇，2004. 苔藓植物对大气污染指示作用的研究进展[J]. 四川环境，23(5)：31-35.]
SUNOVSKA A, HASIKOVA V, HORNIK M, et al., 2016. Removal of Cd by dried biomass of freshwater moss *Vesicularia dubyana*: batch and column studies[J]. Desalination, 57(6): 2657-2668.
SUZUKI Y, TAKENAKA C, TOMIOKA R, et al., 2016. Accumulation of arsenic and copper by bryophytes growing in an aquatic environment near copper mine tailings[J]. Mine Water Environ, 25(3): 265-272.
SZOSZKIEWICZ K, FERREIRA T, KORTE T, et al., 2006. European river plant communities: the importance of organic pollution and the usefulness of existing macrophyte metrics[J]. Hydrobiologia, 566(1): 211-234.
TRETIACH M, ADAMO P, BARGALI R, et al., 2007. Lichen and moss bags as monitoring devices in urban areas. Part I: Influence of exposure on sample vitality[J]. Environ Pollut, 146(2): 380-391.
VANDERPOORTEN A, GOFFINET B, 2009. Introduction to Bryophytes[M]. London: Cambridge University Press: 312.
VÁSQUEZ C, CALVA J, MOROCHO R, et al., 2019. Bryophyte communities along a tropical urban river respond to heavy metal and arsenic pollution[J]. Water, 11(4): 812.
VÁZQUEZ MD, FERNÁNDEZ JA, LÓPEZ J, et al., 2000. Effects of water acidity and metal concentration on accumulation and within-plant distribution of metals in the aquatic bryophyte *Fontinalis antipyretica*[J]. Water Air Soil Pollut, 120(1): 1-19.
VÁZQUEZ MD, FERNÁNDEZ JÁ, REAL C, et al., 2007. Design of an aquatic biomonitoring network for an environmental specimen bank[J]. Sci Total Envir, 388(1-3): 357-371.
VÁZQUEZ MD, VILLARES R, CARBALLEIRA A, 2012. Biomonitoring urban fluvial contamination on the basis of physiological stress induced in transplants of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* Hedw.[J]. Hydrobiologia, 707(1): 97-108.
VISKARI EL, REKILI R, ROY S, et al., 1997. Airborne pollutants along a roadside: assessment using snow

anyalyses and moss bags[J]. Environ Pollut, 97(1-2): 153-160.

WANG AX, FANG YM, 2011. Research advances in bryophyte monitoring technology to heavy metal pollution in the atmosphere[J]. J SW For Univ, 31(5): 87-94. [王爱霞，方炎明，2011. 苔藓植物空气重金属污染技术的研究进展[J]. 西南林业大学学报，31(5)：87-94.]

WEGENER JWM, VAN SCHAIK MJM, AIKING H, 1992. Active biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons by means of mosses[J]. Environ Pollut, 76(1): 1-15.

WEHR JD, EMPAIN A, MOUVET C, et al., 1983. Methods for processing aquatic mosses used as monitors of heavy metals[J]. Water Res, 17(9): 985-992.

WEHR JD, WHITTON BA, 1983a. Accumulation of heavy metals by aquatic mosses. 2: *Rhynchostegium riparioides*[J]. Hydrobiologia, 100(1): 261-284.

WEHR JD, WHITTON BA, 1983b. Accumulation of heavy metals by aquatic mosses. 3: seasonal changes[J]. Hydrobiologia, 100(1): 285-291.

WEI HY, FANG YM, 2004. Review on bryophyte and airborne heavy metal pollution biomonitoring[J]. J Nanjing For Univ, 28(5): 77-81. [魏海英，方炎明，2004. 苔藓植物与环境重金属污染监测研究进展[J]. 南京林业大学学报, 28(5): 77-81.]

XU CH, LU L, 2010. Advance in monitoring of PAHs using bryophytes[J]. Guangdong Chem Ind, 37(3): 181-183. [许春晖，卢龙，2010. 苔藓植物监测大气多环芳烃研究进展[J]. 广东化工, 37(3): 181-183.]

XU YY, ZHEN YY, YU J, et al., 2012. Experimental studies on the potential of two terrestrial mosses in monitoring water contaminated by Cd and Cr[J]. Pol J Environ Stud, 21(5): 1453-1459.

YURUKOVA L, DAMYANOVA A, IVANOV K, et al., 1997. Bioaccumulation capacity of *Fontinalis antipyretica* from Musalenska Bistrica River, Rila Mountain[M]//CARBONNEL JP, STAMENOV JN (eds) Observatorie de montagne de Moussala, OM2, 6. Bulgarian Academy of Sciences, Sofia: 77-86.

YURUKOVA L, GECHEVA G, 2003. Active and passive biomonitoring using *Fontinalis antipyretica* in Maritsa River, Bulgaria[J]. J Balkan Ecol, 6(4): 390-397.

YURUKOVA L, GECHEVA G, 2004. Biomonitoring in Maritsa River using aquatic bryophytes[J]. J Environ Prot Ecol, 5(4): 729-735.

YURUKOVA LD, GANEVA AS, DAMYANOVA AA, 1996. Aquatic bryophytes as bioconcentrators of macro- and microelements[M]//CARBONNEL JP, STAMENOV JN (eds) Observatorie de montagne de Moussala, OM2, 4. Bulgarian Academy of Sciences, Sofia:127-136.

ZHANG YF, MI YC, LIANG LL, et al., 2018. Changes of heavy metal concentrations in *Prionidium setschwanicum* in bogs of Dajiuhu in Shennongjia before and after eco-migration[J]. Wetland Sci, 16(4): 524-529. [张永锋，米雨川，梁莉莉等，2018. 生态移民前、后神农架大九湖沼泽内锯齿藓中的重金属含量变化[J]. 湿地科学，16(4)：524-529.]

ZHENG YY, 2010. The photosynthetic physiology of the terrestrial bryophytes and the application of their monitoring in the water[D]. Shanghai: Shanghai Normal University. [郑园园，2010. 陆生苔藓植物对水体环境适应的光合生理基础及其在水环境监测中的应用[D]. 上海：上海师范大学.]